© Е.И. Шемякин, 2006

УДК 622.02:531

Е.И. Шемякин

МЕХАНИКА ГОРНОГО МАССИВА

Предлагаемый материал объединяет результаты исследований автора за последние 30-40 лет и посвящен одной, узкой, но важной проблеме – изучению части горного массива (горного отвода), связанного с проблемами добычи полезных ископаемых. Это определение расплывчато, пока не идет разговор о конкретных исследованиях.

Давно обсуждается роль масштаба при изучении горного массива, горных пород и их свойств, идут споры до тех пор, пока не определен объект полностью, пока не указаны задачи исследований, не дан перечень инструментария, с помощью которого предполагается решать задачи. Но один, простой, но очевидный пример проясняет дело. Так при разрушении горных пород, при бурении и, особенно при последующем взрывании с целью отделения от массива ощущается « прочность» горной породы. Если в том же массиве заложить и взорвать в тысячу раз более мощный заряд, то тот же массив разлетается как куча песка. Из примера следует, что с масштабом изменяется и перечень свойств, который надо знать о горной породе: вместо «прочности» нужно знать вес породы и трение кусков друг о друга. Этот старый пример, который часто применяют практики – горняки и теоретики-взрывники.

В примере уже была указана роль силы тяжести, которая явно и неявно присутствует в рассуждениях и практических оценках. Отсюда первый круг задач – как влияет сила тяжести и тектонические силы на формирование напряженного состояния в недрах Земли, т.к. в отличие от закона Пуассона прочность твердой среды определяется сложным состоянием, которое характеризуется тремя главными напряжениями и их главными направлениями. Этот переход от гидростатического состояния (жидкость, газ, их смеси) к описанию поведения твердых горных пород является нетривиальным и составляет большую трудность.

Вместе с учетом горно-геологичес-ких условий (неоднородность горного массива, слоистость и изменение тектонических сил) влияние силы тяжести и прочности является едва ли не самым важным предметом исследования в современной механике горных пород.

Наконец, отметим круг проблем, которые можно было бы назвать «космогоническими», т.к. они связаны с влиянием Солнца и планет солнечной системы на напряженное состояние Земли, например, влияние солнечной активности. Сюда же надо отнести исследования по образованию алмазных трубок (удары крупных метеоритов по поверхности Земли), о подвижности больших оползней, о свободном разрушении твердых тел, включая горные породы.

В предисловии надо указать не только предмет исследований, но и направление, программы работ в этом или другом направлении.

С этой точки зрения надо вернуться к истории вопроса, которую автор изложил в предыдущем очерке по исследованиям отечественных авторов в этом направлении.

1. Очерки отечественной геомеханики (горное давление и основы механики горных пород).

Большое внимание к проблемам добычи полезных ископаемых и экономической эффективности этой добычи всегда привлекало внимание ученых и инженеров к самой постановке этих проблем – как применить знание основных законов механики в освоении подземного пространства. С точки зрения механики и ее основ – законов сохранения механики, сохранения масс и сохранения количества движения – добыча угля подземным или открытым способом (в больших объемах), добыча нефти и газа, строительство крупных объектов на земле и под землей – это все действия, связанные с законами сохранения масс, равновесия (или количества движения), сохранения энергии. Проявление этих законов требует грамотного проектирования (учета основных внешних факторов, объективных условий), подготовки необходимых данных, проведения точных измерений параметров (изучения свойств окружающей среды – горного массива) и подходящих экономических оценок.

Конечно, огромный практический опыт в области горных работ работал и без надлежащего обобщения (теории), казалось, и не требовал какой-то науки. Это удивительно, но такие взаимоотношения теории и практики (без искренней взаимности) характерны для всех времен и народов и, к сожалению, для всех правителей народов (и времен.) Но жизнь, практика упорны – они требуют обобщения опыта, создания теории (обобщенного знания) для сознательного и созидательного развития. Так в практике горных работ и их планирования (проектирования), появились правила ведения горных работ, которые долгое время оставались в руках избранных – горное дело являлось искусством отдельных умельцев (которых остались единицы и до наших дней – автору довелось иметь дело с такими замечательными людьми, но об этом отдельный разговор). Время требовало, чтобы это знание стало достоянием многих и многих горных инженеров – так начала развиваться горная наука.

Наблюдая правила действия древних и средневековых горных практиков-умельцев, нельзя не вспомнить старославянские слова: «уметь» – это искусство, а «ведать» – это знать, выучить, научиться. Поэтому уместно начать с теоретической позиции – с обобщения знаний в математической форме, как бы это изложение ни отставало от исторической правды об умении отдельных гениальных провидцев.

В нашем изложении это начало совпадает с публикацией первых результатов Протодъяконова М.М. (старшего). Основной его опубликованный результат – о конечности нагрузки на крепь выработки, несмотря на рост глубины – был не только хорошо известен практикам, но также единодушно не был принят первыми теоретиками: «Как же так? Глубина расположения выработки растет, а давление на ее крепь – нет» [1, 6]. Такая позиция понятна сейчас, но общее мнение было воспитано на законе Паскаля для жидких сред, в которых действительно давление растет с глубиной – и это точный факт. Протодъяконов М.М. первый обратил внимание на то, что горный массив, в отличие от мирового океана (в котором справедлив закон Паскаля), обладает свойствами сопротивления сдвигу (изменению формы), упругому, вязкому или с трением, и это сопротивление сдвигу в массиве играет в пользу горняков – не дает расти нагрузке на крепь, если это знание использовать разумно.

На этом этапе обсуждения уместно начать разговор о месте математических моделей в обсуждениях физических процессов в природе и влиянии этих моделей (абстрактных, обобщенных описаний сложных процессов) на реальное развитие дел: производства, производительных сил и общества в целом. Так знание и становится реальной силой, а носители знания – интеллигенция – реальным участником процесса развития общества. Протодъяконов М.М. понимал этот процесс очень хорошо, этим можно объяснить его энергию и настойчивость в пропаганде нового зна-

ния, ибо реализация его результатов сулила огромные материальные выгоды. По пониманию сущности процесса ближе всех к Протодъяконову М.М. был Т. фон Карман, который в специальных, пионерских опытах оценил сопротивление реальных горных пород сдвигу в условиях, приближенных к заглубленным выработкам, – эти опыты стали классическими. Много позже, знаменитый Л. Мюллер – основатель европейской (венгерской) горной школы также близко подошел к основному результату Протодъяконова М.М., но и он не смог его сформулировать.

Дальнейшее развитие представлений о горном давлении и об основах механики горных пород шло в двух параллельных, поначалу слабо связанных между собой научных направлениях: первое было связано с развитием экспериментальных (лабораторных и полевых, шахтных) исследований – исследования ВНИМИ в школе знаменитого нашего соотечественника Кузнецова Г.Н. по следам Протодъяконова М.М. и Т. фон Кармана, а второе – столь же оригинальное – теоретическое направление, типично ленинградское, связанное с развитием математических методов в теории упругости (Мусхелишвили Н.И., Михлин С.Г., Лехницкий С.Г. и др.) и в теории пластичности (Христианович С.А., Соколовский В.А. и др.), имеется в виду применение этих методов в механике горных пород.

Остановимся на математических моделях, имея в виду их содержательность и краткость в описании. Выше было сказано, что Протодъяконов М.М. отметил и подчеркнул решающую роль сопротивления среды сдвигу (упругость, вязкость, трение) в формировании основных нагрузок на крепь (горное давление), но уже требование теоретической сейсмологии ранее других разделов наук о Земле продиктовало выбор упругой модели среды в качестве основной.

Остановимся прежде на этих математических моделях. Опыт сейсмологических исследований и изучение структуры земной коры показал, что представление о горном массиве как о среде с упругим сопротивлением изменениям объема и сдвига вполне удовлетворительно описывает многие наблюдаемые явления при распространении сейсмических колебаний.

Доказательства справедливости этой модели были обширны, так что на долгие годы математическая модель упругого горного массива стала убедительной (включая ограниченную определенными параметрами разумную схему Динника А.Н.). Это важно отметить, имея в виду многочисленные применения модели упругого тела в горном деле и в инженерной геологии.

Обратимся к основной проблеме – как формируются и изменяются поля напряжений и деформаций в окрестности подземной выработки, будь то подготовительная выработка, скважина или тоннель. С точки зрения упругой модели, простейшей модели, учитывающей сопротивление сдвигу и изменению объема, эта ситуация наиболее изучена: нормальное к поверхности обнажения напряжение обращается в ноль (или приравнивается к величине отпора крепи), а вся нагрузка внешней среды приводит к росту кольцевых напряжений, охватывающих выработку. Эта картина напряженного состояния принципиально отличается от таковой в жидкой среде.

По этой же причине (возникновения кольцевых напряжений) академик Крылов А.Н. одним из первых рассматривал задачи о концентрации напряжений в окрестности палубных вырезов под орудийные башни. Но, тем не менее, основные задачи о горном давлении еще были впереди. По-видимому, первые постановки таких задач были предложены Михлиным С.Г. и Христиановичем С.А., хотя совместные публикации [1, 6 10] и последующее краткое обсуждение оставило некоторые вопросы о приоритетах. Важно для истории и для развития основных результатов то, что в начале этих идей были имена. Христиано-

вича С.Г. и Михлина С.Г. Это очень важно с точки зрения рождения идей и их развития, и это важно не для тех, кто пишет свою историю, а для тех, кто интересуется истиной. Это очень важно еще и потому, что рождение идей, рождение физико-математических моделей (как мы это сейчас видим в сжатом изложении математического описания) – это самое главное наследие ученого, его школы.

Вернемся к основной проблеме горного давления – как рассчитать давление на крепь горной выработки, если даны параметры выработки, свойства горных пород, окружающих выработку, и скорость проходки выработки (скорость изменения напряженного состояния в окрестности выработки). Эта основная задача и была рассмотрена Михлиным С.Г., как задача плоской теории упругости – по Г.В. Колосову и Н.И. Мусхелишвили. Это был, конечно, фундаментальный шаг в области теории прочности твердых тел и в механике горных пород. Полемику, сопровождавшую эти работы, вряд ли можно признать конструктивной – об этом судить трудно и сейчас. Но для нас важно отметить этот этап, потому что это было начало теоретических исследований горного давления, а также потому, что в эти же годы начались интенсивные сообщения об экспериментальных исследованиях и шахтных наблюдениях за проявлениями горного давления (Кузнецов Г.Н. в СССР, Мюллер и Якоби – в Западной Европе и др., довоенные публикации из Канады и Южной Африки, Австралии неизвестны, хотя по масштабам горных работ можно догадываться, что работы по механике горных пород там уже велись).

С обсуждаемых позиций можно отметить, что теоретических работ по геомеханике до работ Михлина С.Г., Христиановича С.А., Динника А.Н, Кузнецова Г.Н. и Савина Г.Н. не появилось.

Одной из главных проблем, которую привнесла с собой математическая модель явления, была концентрация напряжений и деформаций в угловых точках выработки (прямоугольник или квадрат в рассматриваемой плоскости – Михлин или Савин), эта проблема почему-то стала главным препятствием на пути применения методов теории упругости в задачах горного дела. Понадобились большие усилия и годы напряженного труда для того, чтобы теоретики и практики нашли приемлемое решение и достигли взаимопонимания. Этот этап в развитии геомеханики связан с двумя работами Христиановича С.А. – о напряженно-деформиро-ванном состоянии угольного пласта в призабойной зоне и о гидравлическом разрыве нефтяного пласта. Здесь, в первую очередь, отразилась полемика с первыми (собственными, практическими, результатами решений плоской задачи теории упругости), а самое главное, появились новые математические модели. Действительно, в первой задаче (о призабойной зоне угольного пласта, в зоне отжима – в области интенсивного деформирования) условия равновесия достаточно было выполнить интегрально – по величине главного вектора в проекции на нормаль к границе с пластом – это рациональное требование, включая определяемую из этого условия длину зоны отжима сняло вопросы, связанные с концентрацией напряжений на забое (границе угольного пласта и выработки). Конечно, вопрос о поведении материала в призабойной зоне при этом до конца не исследовался (в качестве первого приближения предлагалось применять известное решение Прандтля Л., возможно применение решения Ильюшина А.А. о сжатии пластической полосы между жесткими плитами). Но главный шаг был сделан – теоретическое решение существенно приблизилось к описанию реального процесса. Во второй задаче – о гидравлическом разрыве нефтяного пласта был сделан решающий шаг в понимании процесса разрушения горных пород в естественном залегании. Это сейчас, через 50 лет, появились представления о регулярных, измеряемых блочных структурах горного массива (Садовский М.А., Родионов В.Н.,

сибиряки и др [6]), в котором нужно не столько создавать новые поверхности (разрушать горные породы), сколько обнажать подходящие границы блоков (Христианович С.А.), а тогда нужна была изрядная интуиция для того, чтобы ввести гипотезу о плавном смыкании берегов трещины гидроразрыва. Это предположение замкнуло задачу и позволило определить все необходимые параметры. Прошло много лет, и сейчас видно, что эти две задачи были необходимыми и естественными этапами развития механики горных пород.

К этим этапам надо отнести интенсивное развитие опытных работ в лабораторных и шахтных условиях (в СССР – ВНИМИ, ИГД им. А.А. Скочинского, ИГД Сибирского Отделения АН СССР, в Кольском Центре АН СССР, в горных институтах Москвы, Ленинграда, а также на Украине, в Казахстане, на Урале и в Киргизии). Эти работы были хорошо организованы, материально поддержаны промышленностью и АН СССР, в ней принимали активное участие многие известные специалисты (Турчанинов Г.А, Ержанов Ж.С., Руппенейт К.В., Булычев Н.С., Ямщиков В.С., Чирков С.Е., Петухов И.М, Амусин Б.З., Айтматов И.Т., Кузнецов С.В. и многие др.). Для нашего обзора важно упомянуть первое издание по вопросам горного давления (начало регулярных выпусков в 1959 г., по-видимому) и первое международное издание – ФТПРПИ (с регулярным переводом в странах английского языка с 1965 г.). Надо подчеркнуть, что во главе этих изданий стоял известный горный специалист, тогда зам. председателя Сибирского Отделения АН СССР, член-корр. АН СССР Горбачев Т.Ф.

Так получилось, что до 1985 года работы по механике горных пород стали сосредотачиваться в центре и в Сибири, так как уже проявлялись трудности общения и регулярных встреч специалистов и в рамках СССР и, особенно, в рамках СЭВ, где работа по геомеханике, особенно в экспериментальном плане, шла в семидесятые годы весьма эффективно – ежегодные встречи по очереди в каждой из стран с проведением измерений в шахтных условиях, с регулярными обсуждениями подготовленных к изготовлению и испытаниям новых приборов и новых методик.

Насколько это сейчас достоверно известно, в других странах не было ни такого широкого уровня исследований, ни такого делового контакта в общении специалистов. Об этом можно судить и по публикациям в международной печати и, особенно, по сравнению качества (новизны и содержательности) публикаций с отечественными, несмотря на большие трудности, искусственно созданные перед отечественными авторами в этой области науки (имеется в виду отсутствие ссылок на отечественные исследования). Попытки общения предпринимались и ранее (до создания Международного общества по механике скальных пород), эти этапы кооперации специалистов по механике горных пород были организованы учеными Польши, которым многим обязана современная геомеханика.

Обратимся к обсуждению экспериментальных результатов Протодъяконова М.М. и их современной интерпретации, основываясь на материалах статьи [6] и книге [9], в которых рассматривается задача о взаимодействии крепи горных выработок с массивом и которую надо считать основной задачей механики горных пород. Это исследование приобретает особенно большое значение при освоении глубоких месторождений угля и руды (а также в сложных горно-геологических условиях), при проектировании и строительстве глубоких шахт и создании систем разработки полезных ископаемых для больших глубин.

При решении задач о взаимодействии крепи выработок с горным массивом необходимо знать не только основные деформационные характеристики горных пород вплоть до разрушения, но и исходное состояние горного массива, окру-

жающего выработку. Таким образом, надо учитывать не только упругие свойства массива, что подсказала сейсмологическая практика, но и такие свойства горного массива, как сцепление и трение. Это связано с тем, что при возрастающих нагрузках паспорт прочности указывает (Т. Карман, Г. Кузнецов и др.) на возрастающее влияние трения при сдвижении горных пород и на уменьшающееся влияние сцепления. Если величину последнего оценивать некоторым значением **c**, и сравнивать с характеристикой γ напряженного состояния нетронутого массива, то принято считать, что область сравнительно небольших нагрузок определяется безразмерным параметром $c/\gamma H < 1$, а больших нагрузок (в частности, для больших глубин разработки) условием $c/\gamma H > 1$.

В пределах первой области, что отвечает либо небольшим глубинам разработки, либо прочным породам массива, было возможно применять представление о малых деформациях массива при расчетах крепи. При этом оценка прочности была связана с величиной сцепления. Так развиваются расчетные схемы, основанные на типичных моделях механики сплошной среды с учетом малых необратимых деформаций.

В пределах второго диапазона, который включает либо большие нагрузки, либо сравнительно непрочные области массива, следует применять иные представления. В этих случаях прочность горного массива определяется его блочной структурой, взаимным перемещением блоков с трением по поверхностям скольжения [7]. Эти перемещения наблюдаются при внешних смещениях горных пород в окрестности выработок, вблизи обнаженных поверхностей, за счет податливости крепи или ее передвижки.

Имеет место и переходный диапазон, в котором необходимо учитывать и трение, и сцепление. При малых перемещениях проявляется деформационная способность до исчерпания сцепления, а при развитых перемещениях дополнительная прочность определяется трением по возникающим поверхностям скольжения.

В исследованиях по механике горных пород основное внимание уделяется экспериментальным методам наблюдения за перемещениями в горном массиве в окрестности выработок и оценкам возникающих напряжений, которые изменяются от исходного состояния до критических значений при проведении горных работ. Эти исследования ведутся механиками, геофизиками и горными инженерами как с практической целью освоения больших глубин (т.е. при освоении глубоких месторождений угля и руды, при проектировании и строительстве глубоких подземных сооружений), так и с целью изучения напряженного состояния земной коры. Развитие инструментальных методов требует основательного проникновения физических знаний в горные науки. Это связано с анализом физических процессов, происходящих в горных породах при деформировании и разрушении, с разработкой приборов и средств автоматизации.

Рассмотрим сначала простую ситуацию в окрестности забоя при подземной разработке пологого пласта полезного ископаемого (уголь, например). Пусть в исходном состоянии напряженное состояние описывается гидростатическим (простейший вариант)

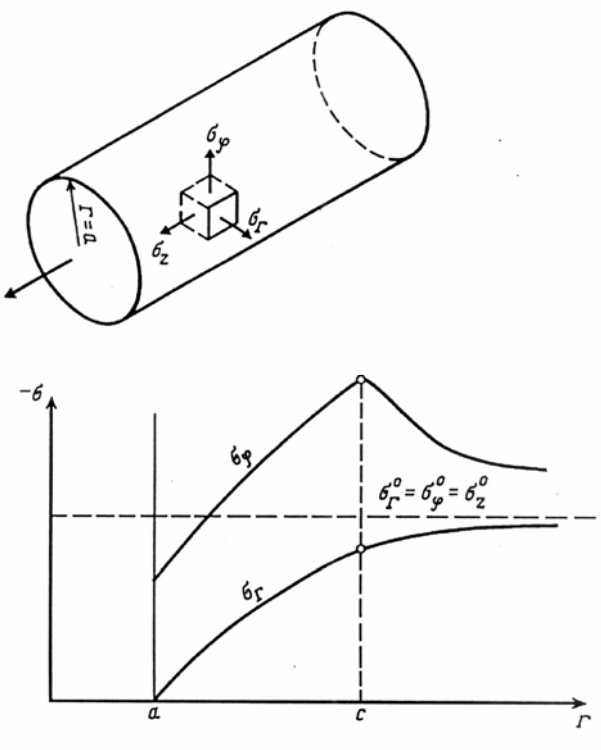


Рис. 1. Общий вид выработки и скважины

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = -p \qquad (1)$$

(обозначения координат и площадок, на которых действуют главные напряжения σ_1, σ_2, σ_3, указаны на чертеже рис. 1). Направление развития очистных работ указано стрелкой и происходит в условиях, приближенных к плоской деформации [1, 2, 6]. Если рассмотреть элементарный объем в глубине пласта, то этот объем находится в состоянии всестороннего сжатия с деформациями ε_1, ε_2, ε_3

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x,\ \varepsilon_2 = \varepsilon_y,\ \varepsilon_3 = \varepsilon_z \qquad (2)$$

затем, при развитии очистных работ попадает в зону опорного давления (γ в несколько раз по величине превосходит c, а ε_x уменьшается по величине по сравнению с γ вплоть до нуля на забое). При этом, вообще говоря, ε_z может и не изменяться. Такая картина распределения напряжений в рассматриваемом примере является общепринятой в настоящее время, подтверждается в опытах, что касается величин σ_1, σ_2, $\sigma_3 = \sigma_z$, измеряется редко).

Рассматриваемый объем претерпевает следующее деформирование при движении забоя $\sigma_1 = \sigma_x \to 0$ – при переходе из нетронутой части пласта через зону опорного давления к поверхности забоя. Сначала развивается напряженное состояние $\sigma_1 > \sigma_2$,

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 2\mathrm{T},$$
$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2\mathrm{T}_{13},\ \sigma_2 - \sigma_3 = 2\mathrm{T}_{23} \qquad (3)$$

в котором максимальные касательные напряжения и главные сдвиги Γ_{12}, Γ_{23} и Γ ориентированы по площадкам сколь-жения, которые, как известно, проходят через ось z и образуют углы $\pm\pi/4$ с этой осью (рис. 2), растет деформация сжатия и деформация $\varepsilon_1 = \varepsilon_x$. В средней части пласта касательные напряжения практически отсутствуют, и реализуется напряженно-деформированное состояние с указанными главными напряжениями и деформациями.

Как принято в теории прочности твердых тел, сжимающие напряжения считаются отрицательными, все критические значения параметров положительные.

Приближение забоя к рассматриваемому элементарному объему приводит к иному напряженному состоянию

$$\sigma_1 > \sigma_z > \sigma_2 \qquad (4)$$

что характерно для больших глубин разработки $c/\gamma H < 1$. Это изменение означает, что максимальные касательные напряжения теперь действуют на других площадках, проходящих через ось z и образующим с нею углы $\pm\pi/4$ (рис. 2). Возникновение новой системы площадок скольжения, характерное для больших

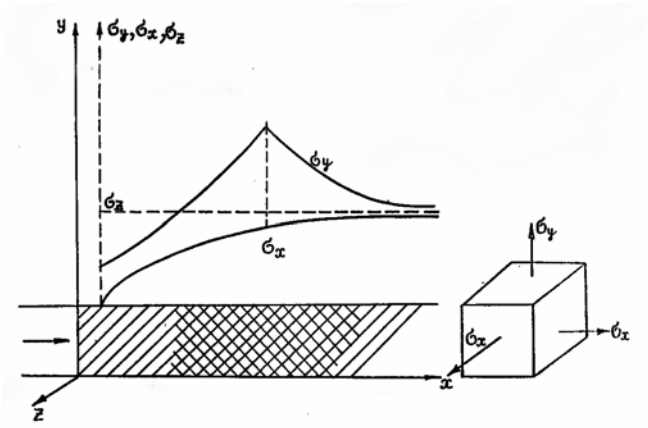


Рис. 2. Распределение напряжений в призабойной зоне пласта в горизонтальном пластовом месторождении

глубин, означает, что происходит дальнейшее ослабление (разупрочнение) пласта, сопровождающееся дальнейшим ростом деформаций $\gamma = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$. При этом развитие сдвигов по первой системе площадок при практически постоянном значении γ_{12}, либо даже при уменьшении γ_{12} (за счет ниспадающей ветви на диаграмме (рис. 3), можно принять $\gamma = const$.

Этот пример показывает качественные изменения в пространственном напряженно-деформирован-ном состоянии при движении забоя из простого состояния (рис. 1). Если в нетронутом горном массиве исходное состояние отлично от гидростатического, то может возникнуть иная картина развития деформаций – для анализа необходимо иметь сведения об исходном состоянии в пространстве и эти сведения можно получить только из опыта в натурных условиях.

О кольцевой прочности. Во всех задачах механики горных пород основной является задача о прочности (устойчивости) горных пород в окрестности подземной выработки. Основной моделью для таких рассуждений является круговая выработка определенного диаметра, на заданной глубине и ориентировке относительно главных напряжений σ_1, σ_2, σ_3 со своими главными направлениями. (Наиболее распространенным случаем является выбор главных направлений,

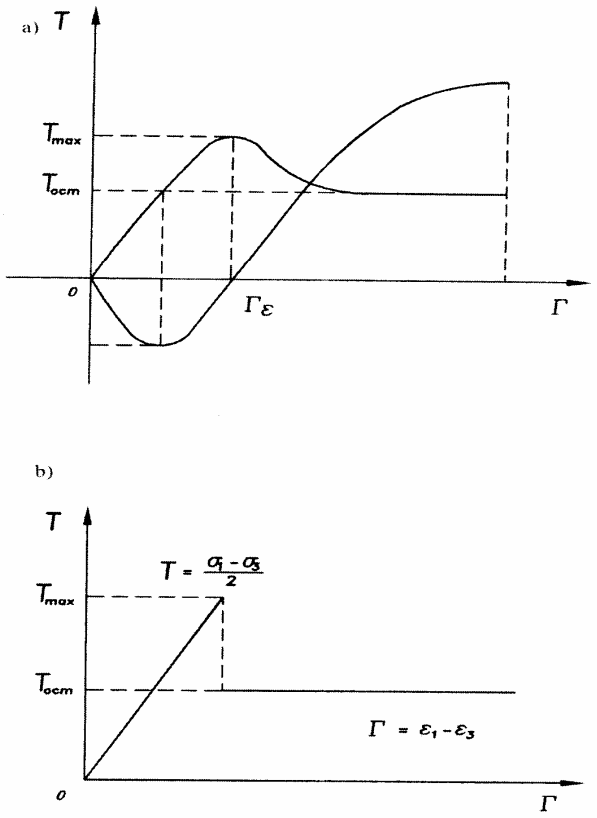
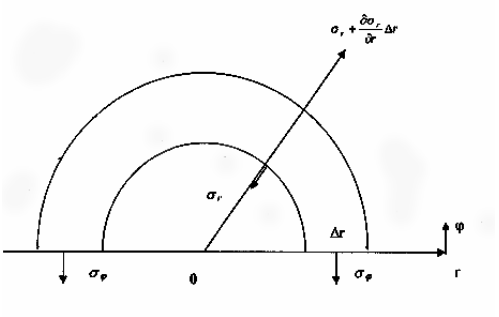


Рис. 3. Зависимость максимальных касательных напряжений от главных сдвигов с учетом ниспадающей ветви



связанный с направлением (вертикалью) силы тяготения σ_1, и боковых напряжений, направления которых перпендикулярны главному направлению силы тяготения).

Самым ответственным моментом в создании такой выработки как подземного сооружения является изменение исходных соотношений между главными напряжениями в окрестности выработки при ее создании. Если принять пока для простоты, что на глубинах 2-3 км исходное напряженное состояние (in situ) было равномерным, гидростатическим (1), то после проходки выработки, будь то скважина (горизонтальная или вертикальная) или шахтный ствол, напряженное состояние изменится.

Важно отметить, что это изменение не есть следствие фантазий, предположений о модели деформируемости среды, а отражение законов равновесия (или динамики, квази-статики в процессе проходки или бурения). Так, например, если главные направления напряженного состояния σ_1, σ_2, σ_3 выбрать в соответствии с цилиндрической системой координат горизонтальной выработки, то в ходе подготовки выработки (скважины) *обязательно* происходят два процесса:

- **Первый** из них связан с тем, что радиальное напряжение обязательно падает по величине, даже если со стороны выработки (скважины, например) оказывается возможным организовать подпор, по величине *меньший,* чем было радиальное напряжение до проходки скважины, например. Это приводит к возникновению разностей нормальных напряжений, т.е. приводит к развитию касательных напряжений – это и есть проявление прочности.

- Поэтому**, второй** частью процесса является это развитие касательных напряжений за счет созданного различия в главных напряжениях исходного состояния и связанного с этим развития неупругих деформаций. Так, в рассматриваемом примере (вертикальная выработка – скважина в равномерном in situ напряженном состоянии) возникают касательные напряжения, которых не было до работ, а именно (3) в окрестности вертикальной выработки.

Во-первых, все твердые тела обладают конечным сопротивлением сдвигу – $T_{max,}$ после достижения чего изменяется представление о прочности среды. Это рассуждение не связано с тради-ционными взглядами на прочность горных пород или твердых тел, а скорее обращено к Т. Карману, который считал, что при переходе от исходного (возможно, упругого) состояния, вместе с ростом Т по величине, необязательно σ_z теряет свою (упругую) связь, существовавшую до проходки выработки или скважины. Возникновение анизотропии сопротивления сдвигам в результате роста касательных напряжений и изменения сопротивления сдвигам по разным площадкам скольжения является едва ли не самым примечательным механическим эффектом создания выработок (скважин) в горном массиве.

Поэтому, естественно до детального подробного анализа различных вариантов (негидростатическое напряженное состояние, горизонтальная или вертикальная скважина, слоистость окружающего масси-ва и его блочная структура) обратить внимание на этот основной процесс – изменение сопротивления сдвигу на различных площадках, включая новые современные элементы: проявление ниспадающей ветви (*post-peak behaviour of rock under loading*) со всеми эффектами парадоксального для сплошной среды проявления.

Таким образом, изучение напряженно–деформированного состояния в окрестности выработки (скважины) сведено к исследованию *сдвиговой* прочности горного массива как определенного физико-механического свойства (рис. 4).

Уравнение равновесия плоского кольца:

$$r\frac{\partial\sigma_r}{\partial r}+\sigma_r-\sigma_\varphi \quad или \quad \sigma_\varphi=\frac{\partial}{\partial r}(r\sigma_r)$$

$$при \quad \sigma_r \longrightarrow 0;\ r \longrightarrow a$$

$$\frac{\partial\sigma_r}{\partial r}=\frac{\sigma_\varphi-\sigma_r}{r}\approx\frac{T_{ост}}{r};\ \sigma_\varphi>\sigma_2\approx$$

$$\approx\frac{1}{2}\left(\sigma_\varphi+\sigma_r\right)>\sigma_r,\ т.е.\ \ \mu_\sigma=0-чистый\ сдвиг.$$

При этом основное изменение объема, включая критическое разрыхление до вывала в обнаженное пространство, будет связано с эффектом *дилатансии* – изменением объема, связанным со сдвигом [10, 13]. Это изменение объема позволит ввести в рассмотрение фильтрацию жидкости и газа (нефти и конденсата в том числе) в объеме в окрестности скважины (выработки), подвергнутом изменению напряженного деформированного состояния.

Рассмотрим прежде основные особенности сдвигового деформирования, принимая первой гипотезу Т. Кармана, что наступление предельной деформации сдвига на основных площадках с касательными напряжениями Т не нарушает упругих (или других) связей между напряжениями и деформациями во втором главном направлении. В этом приближении можно считать, что на системах площадок с напряжениями T_{12} и T_{23} повторится (возможно, с некоторыми вариациями) та же самая ситуация, что и на главных площадках с касательным напряжением Т (рис. 5, *а*). Поэтому рассмотрим внимательнее поведение среды при сопротивлении сдвигу на диаграмме Т=Т(Г), где Т – максимальное касательное напряжение, а Г – главный сдвиг, $\Gamma=\varepsilon_1-\varepsilon_3$ (при совпадающих главных направлениях напряженного и деформированного состояния) (рис. 5, *б*).

Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние в окрестности выработки (скважины)

На рис. 5 представлены описательные результаты реальных испытаний опытных образцов грунтов (в том числе с эквивалентными материалами) и горных пород [9, 10, 13]. После практически обратимых деформаций до пика касательных напряжений T_{max} (сопротивление сдвигу с ростом деформаций падает – иногда это называют *разупрочнением*).

Это – самый важный для современных задач горного дела и механики грунтов участок необратимого поведения горной среды, который стал доступным после создания «жестких» машин для испытаний грунтов и горных пород, взамен машин с заданным нагружением по усилиям (напряжениям). Таким методом испытаний стал «ящик» сибиряков (развитие идей Роско), а на самом деле это была планомерная реализация идей А.А. Ильюшина о создании машин с нагружением по деформациям, а не по программе напряжений, как до него [9].

Что обнаружилось в этих новых результатах, по мнению автора?

Первое. Возникновение структуры в изначально однородном и изотропном материале, вполне согласованной с подготовленными площадками максимальных касательных напряжений (возможно, с учетом трения по площадкам реального скольжения) [6, 7, 9].

Второе. Несимметрия функционирования площадок скольжения (в отличие от предсказаний механики сплошной среды), которая явно проявляется уже при малых деформациях и является основным процессом (несимметрия) при развитии деформаций вплоть до разрушения [7, 8].

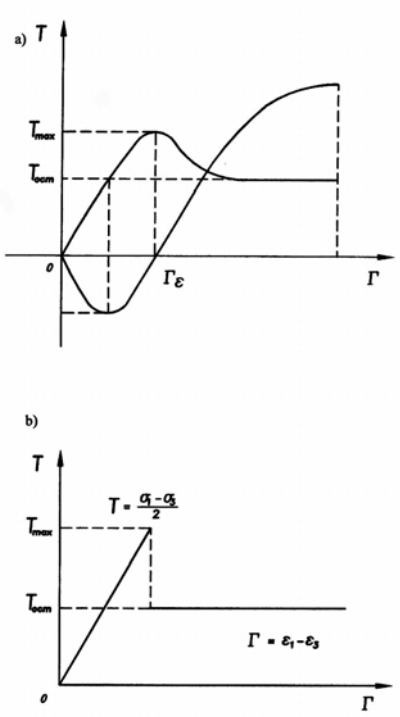


Рис. 5. Связь деформации сдвига и объема

Третье. В области, где элементы горной породы и грунтов находятся в послепиковом состоянии (иногда, это состояние и называют запредельным, состоянием разупрочнения) деформация в целом, в конечном объеме осуществляется как скольжение блоков (практически жестких) друг по другу с вращением относительно друг друга так, чтобы составить квази-сплошную среду [6, 7, 8].

В целом, это новое представление о деформации грунтов и горных пород за счет сдвигов и преодоления прочности сдвигу сводится к тому, что в рассматриваемом конечном объеме *реально* проявляются площадки скольжения, разделение тела на блоки и значит несущая способность такой среды должна рассчитываться по этой схеме вплоть до разрушения среды.

Предлагаемые новые (старые) позиции были отражены в двух статьях автора совместно с его учителем С.А. Христиановичем [1, 2], а затем получили развитие в следующих статьях [6, 7, 8].

Введение новой группы инвариантов, описывающих напряженно-деформированное состояние горной породы в окрестности подземной выработки (скважины), но, конечно, в силу инвариантности, пригодных и для других ситуаций в горном массиве.

В соответствие с этим вместо (1) или аналогичных утверждений, предлагается рассмотреть три инварианта:

$$\mathrm{T} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2},$$

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \qquad (5)$$

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}.$$

Нетрудно видеть, что этот набор инвариантов является “новым”, т.к. он опирается на параметры T и σ_n, и “старым”, т.к. вводит в рассмотрение параметр Лодэ-Надаи, характеризующий роль прочности массива по другим площадкам T_{12} и T_{23}:

$$\mu_\sigma = \frac{\mathrm{T}_{23} - \mathrm{T}_{12}}{\mathrm{T}} \qquad (6)$$

Это простое физическое истолкование, по-видимому, более адекватно обсуждению вопросов о прочности твердых тел [11, 12].

Набор инвариантов (5), конечно представляет определенные удобства при оценке прочности массива в конкретных ситуациях (так, например, сечение поверхности $\mathrm{T}(\sigma_n, \mu_\sigma)$ при $\mu_\sigma = 0$ дает вполне удовлетворительное описание огибающей кругов Мора, как это широко принято). Но этого недостаточно. Достижение предельного напряженного состояния (в смысле величин (5)) абсолютно недостаточно для суждения о достижении предела прочности или исчерпании несущей способности сплошной среды в конкретных ситуациях (в окрестности скважины, выработки, на откосе, при оползнях и т.д.).

Главным дополнительным рецептом исследования послепикового поведения горных пород является исследование деформаций

$$\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \varepsilon_3 \qquad (7)$$

Если при последовательном нагружении исходного (in situ) состояния не возникает вопрос ни о соответствии знаков в (1) и (7), ни о соответствии главных направлений напряженного и деформированного состояний, то в целом для характеристики необратимых деформаций и разрушения необходимо также ввести три новых инварианта:

$$\Gamma = \varepsilon_1 - \varepsilon_3,$$
$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_3, \qquad (8)$$
$$\mu_\varepsilon = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}$$

И дело здесь не только в том, что T = T (Γ) – зависимость, которая должна быть определена в «чистых» условиях, т.е. при $\mu_\sigma = \mu_\varepsilon = 0$, в состоянии основного сопротивления материалам сдвига, а еще и в том, что на ниспадающей ветви напряжения и деформации не связаны между собой однозначной зависимостью (вспомните идеальную пластичность!), а представляют собой независимо и по отдельности определяемые из законов механики величины:

- **Напряжение** (усилие) определяется из законов равновесия или движения;
- А **деформации** – из законов сохранения массы с учетом дилатансии [9, 10, 13].

Во многих конкретных ситуациях такие критические деформации удается оценить, но, по-видимому, работа в этом направлении предстоит большая, как и в указанных конкретных направлениях – исследования зависимости T = T (Γ) при $\mu_\sigma \neq 0$ и $\mu_\sigma = \pm 1$.

При изучении деформаций в окрестности выработки или скважины фильтрация обычно играет второстепенную роль, что вряд ли справедливо, т.к. в задачах для угольного пласта фильтрация газа определяет многие важные явления. Это тем более важно для нефтегазового пласта. Предлагается определять фильтрацию в нефтегазовом пласте не за счет изменения объема блоков, которые возникают при сдвиговой деформации в зоне послепиковой деформации, а за счет других законов [9, 10, 13], например, законов *дилатансии* – изменения объема при реализации сдвига, включая его критические значения $\Gamma_{кр}$.

Это явление до сих пор не получило бы признания, если бы не работы наших теоретиков в области механики грунтов и горных пород [1, 9]. Дело в том, по нашему мнению, что непонимание этого явления связано с отсутствием опытных фактов и наблюдений за поведением материалов на ниспадающей ветви. Поэтому, очевиден интерес к ниспадающей ветви на диаграмме T = T (Γ) (а, как следствие, и на диаграмме $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ одноосного сжатия). Здесь очень важно оценить и эффект дилатансии.

В области $T > T_{max}$ (послепиковое давление) развиваются не только общие деформации, но и деформации сдвига (а, значит, и дилатансия) – и этот эффект в изменении объема (сумма изменений объема за счет изменения среднего напряжения и изменения объема за счет сдвига) оказывается самым существенным. Трудно переоценить эту гипотезу по сравнению с другими (изменение объема скелета, объема пористости, эффекта проницаемости), т.к. проявление площадок скольжения, связанной с ним дилатансии, является, по-видимому, основной причиной для закона фильтрации. Изменение объема вследствие дилатансии оказывается в интересующей нас области (для задач нефти и газа) генеральным.

Закон фильтрации, в отличие от «закона» Дарси надо сформулировать в виде:

$$\nu = \nu(T, \sigma_n) \qquad (9)$$

где ν – функция максимального касательного напряжения и нормального напряжения, препятствующего скольжению по площадкам. Каким образом связаны T и σ_n и связаны ли вообще – этот вопрос можно обсуж-

дать, но скорее с точки зрения паспорта прочности (блочности) и ожидаемой проницаемости.

Что же касается того, что связано с разрушением, вывалами в вертикальных и, особенно, горизонтальных скважинах (выработках), здесь необходимо задание величин $\Gamma_{кр}$, конечно, в зависимости от ε_n, μ_n.

В заключение укажем интерпретацию известного постановления о признании открытием зональной дезинтеграции в окрестности подземной выработки (где многое непонятно, несмотря на многие публикации.

Слой горных пород между поверхностью выработки (скважины) и поверхностью, на которой достигается максимальное кольцевое напряжение играет роль «крепи» и оценивается произведением максимального кольцевого напряжения на площадь кольца этого слоя. Это простое правило должно быть введено в правила горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Христианович С.А., Шемякин Е.И.* К теории идеальной пластичности, Изв. АН СССР, МТТ №4 1967 с.87-97.
2. *Шемякин Е.И.* Применение упруго- пластического анализа при измерении напряжений в горных породах (материалы 3-го семинара по измерению напряжений в горных породах, Н-сибирск, ИгД СО АН СССР 1972).
3. *Шемякин Е.И., Штейн М.Ш.* Применение упруго- пластического анализа при измерении напряжений в горных породах методом разгрузки керна с центральной скважиной, ФТПРПИ 1973 № 6 с.12-20.
4. *Кузнецов Г.Н.* Механические свойства горных пород, УГЛЕТЕХИЗДАТ,1974.
5. *Давиденков Н.Н., Ставрогин А.Н., Петрова Н.А.* Критерии прочности при хрупком разрушении, ДАН СССР,1964 т.154 №1.
6. *Шемякин Е.И.* Две задачи механики горных пород, связанные с освоением глубоких месторождений руды и угля, ФТПРПИ 1975, № 5 с.29-45.
7. *Ревуженко А.Ф., Стажевский С.Б., Шемякин Е.И.* Задачи механики сыпучих сред в горном деле, ФТПРПИ 1982, №3 с.19-26.
8. *Ревуженко А.Ф., Стажевский С.Б., Шемякин Е.И.* О несимметрии пластического течения в сходящемся симметричном канале, ФТПРПИ, 1977 с.3-9.
9. *Булычев Н.С.* Механика подземных сооружений, М. Недра, 1982.
10. *Ревуженко А.Ф., Стажевский С.Б., Шемякин Е.И.* О структурно-дилатансионной прочности горных пород, ДАН СССР,1989 Т.305, 3 5 с1077- 1080.
11. *Шемякин Е.И.* Синтетическая теория прочности, часть 1. Физическая мезомеханика, 1999 Т.2, № 6 с.63-69.
12. *Шемякин Е.И.* Синтетическая теория прочности, часть 2. Физическая мезомеханика, 2000 Т.3. № 5 с. 11-17.
13. *Zamakhaev V.S.* Transition processes in strata under initial stripping, Drilling, 2001, T.2, c. 37-41.
14. *Shemyakin E.I.* Brittle fracture of solids, II (share strength of rock), Moscow Univ., 2003, Mechanics Bulletin, Vol. 58, No. 3, pp. 23-27.

Коротко об авторах

Шемякин Е.И. – академик РАН, Московский государственный университет.